

地质通报
Geological Bulletin of China
ISSN 1671-2552, CN 11-4648/P

《地质通报》网络首发论文

题目：鞍本地区弓长岭铁矿床成矿地质—地球物理特征与找矿预测研究——以高家沟铁矿为例
作者：李飞，蒋永臻，贾三石，付建飞，李乃琨，蒙嘉琪，于雷，姜小龙
网络首发日期：2025-01-15
引用格式：李飞，蒋永臻，贾三石，付建飞，李乃琨，蒙嘉琪，于雷，姜小龙. 鞍本地区弓长岭铁矿床成矿地质—地球物理特征与找矿预测研究——以高家沟铁矿为例[J/OL]. 地质通报. <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250115.1027.008>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

鞍本地区弓长岭铁矿床成矿地质—地球物理特征与找矿预测研究

——以高家沟铁矿为例

李飞¹, 蒋永臻¹, 贾三石^{2, 3, 4}, 付建飞², 李乃琨¹, 蒙嘉琪², 于雷⁵, 姜小龙⁵

LI Fei¹, JIANG Yongzhen¹, JIA Sanshi^{2, 3, 4}, FU Jianfei², LI Naikun¹, MENG Jiaqi², YU Lei⁵, JIANG Xiaolong⁵

1. 辽宁有色勘察研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110013;
2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004;
3. 东北大学秦皇岛分校资源与材料学院, 河北 秦皇岛 066004;
4. 海洋油气勘探国家工程研究中心, 北京 100028;
5. 辽宁省有色地质一〇三队有限责任公司, 辽宁 丹东 118000
1. Liaoning Non-ferrous Geological Exploration and Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110013, Liaoning, China;
2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004;
3. College of Resources and Materials, Qinhuangdao Campus, Northeastern University, Qinhuangdao 066004, China;
4. National Engineering Research Center for Offshore Oil and Gas Exploration, Beijing 100028, China;
5. Liaoning Nonferrous Geology Team 103 Co., Ltd., Dandong 118000, Liaoning, China

摘要: 针对鞍本地区高磁异常背景区中的隐伏铁矿找矿技术难题, 选择弓长岭铁矿床一采区、二采区为研究对象, 系统分析研究得到地质和地球物理找矿标志, 并构建地质—地球物理找矿预测模型, 并在已有铁矿边部的相对低缓的航磁异常范围内开展地面高精度磁法测量工作, 在此基础上耦合地质测量成果为约束条件对大比例尺磁法剖面测量进行正反演计算分析, 识别存在的隐伏铁矿体, 采用钻探工程对其进行深部验证, 成功的发现隐伏铁矿体的存在, 并估算其资源量在千万吨以上。本次找矿预测研究工作构建的找矿模型、采用的技术流程和方法组合不仅达到了矿山增储增量的目的, 也为弓长岭铁矿床外围进一步的找矿工作提供了一定的借鉴意义。

关键词: 鞍本地区; 铁矿; 高家沟; 地球物理; 找矿预测

Study on metallogenic geological-geophysical characteristics and prospecting prediction of Gongchangling Iron ore concentration area in Anben area--A Case Study of the Gaojiagou Iron Mine

Abstract: Aiming at the technical problems of prospecting for hidden iron ore in the background area of high magnetic anomaly in Anbene area, the first mining area and second mining area of Gongchangling iron ore deposit are selected as the research objects, the geological and geophysical prospecting indicators are obtained through systematic analysis and research, and the geological-geophysical prospecting prediction model is constructed, and the surface high-precision magnetic survey work is carried out within the relatively low aeromagnetic anomaly range of the existing iron ore edge. On this basis, coupled with the geological survey results as a constraint condition, the forward and inverse calculation analysis of large-scale magnetic profile survey was carried out to identify the existing hidden iron ore body, and the deep verification was carried out by drilling engineering. The existence of hidden iron ore body was successfully discovered, and its resources were estimated to be more than 10 million tons. The prospecting model and the combination of technical processes and methods adopted in this research work not only achieve the purpose of increasing mine reserves, but also provide a certain reference for further prospecting work in the periphery of Gongchangling iron deposit.

资助项目: 科技部“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC2903701); 辽宁省级地质勘查项目(编号: JH23-210000-06455)

作者简介: 李飞(1990-), 男, 高级工程师, 从事金属矿床找矿研究与预测工作。E-mail: li15104156300@163.com

*通信作者: 贾三石(1982-), 男, 博士, 副教授, 从事金属矿床的区域成矿学研究。E-mail: jiasanshi@neuq.edu.cn

Key words: Anshan-Benxi Region; Iron ore deposit; Gaojiagou; Geophysics; Mineral prediction

铁矿作为全球经济支柱的战略性金属矿产，不仅在工业生产和科技进步中发挥着重要作用，还是国家安全和经济发展的重要保障。我国铁矿石长期依赖进口，使得铁矿成为我国最为紧缺的大宗战略性矿产之一（李厚民等，2022）。前寒武纪条带状铁建造是世界上最重要的铁矿类型，其特点是规模大、易开采、易选矿，且其形成的富铁矿占全球富铁矿储量的 70% 左右，占全球铁矿产量的 90% 以上。国际上前寒武纪条带状铁建造主要分布在澳大利亚、巴西、俄罗斯、中国、加拿大、非洲、印度和美国等地。我国是世界上条带状铁建造重要分布区之一，其主要分布于华北克拉通内的鞍山—本溪、密云—冀东、五台—吕梁、霍邱—舞阳和鲁西等地区（张连昌等，2012）。进入 21 世纪，中国现代化进程明显加快，国内钢铁工业翻番增长，导致铁矿石需求急剧增长。由于我国国内铁矿供应不足，铁矿石进口规模持续增长，使得中国成为全球最大铁矿石进口国，导致近年来铁矿石价格逐年飙升（张承帅等，2011）。因此，条带状铁建造（BIF），特别是其经受变质作用形成的沉积变质型铁矿一直是我国矿产资源开发利用和找矿突破的主要对象。

沉积变质型铁矿多位于高磁场背景区，其内已发现的铁矿磁异常多在数千乃至数万 nT 以上，随着地表矿、易识别矿、浅部矿的日益减少，找矿难度正日益增大，找矿效果也日益降低，矿产勘查已经面临了“三难”的局面，即“难识别、难发现和难开发”的矿越来越多。低缓磁异常下的隐伏铁矿便成为了寻找深部隐伏矿的主要对象（田文法等，2010；郑通科等，2015），近些年以来，为了验证航磁局部异常，运用地面高精度磁测、勘查线剖面高精度磁测和钻探验证等综合勘查方法对其内存在的相对低缓磁异常进行了找矿评价工作，并在多个地区实现了找矿突破，发现了多处隐伏的铁矿床，如辽宁榆树铁矿、山东沟西铁矿、湖南易家湾、山东核桃园铁矿等（李振阳等，2015；张旭等，2013；丁志强等，2021；何平，2022）。

但已有铁矿山边部的相对低缓航磁异常，磁异常值总体集中于数百 nT，往往被传统的找矿方向所忽略，在某种程度上制约了沉积变质型铁矿的深边部找矿突破。该情况在鞍本地区表现得尤为突出，源于其具有丰富的铁矿资源，且多为露天矿，形成了特有的高磁场背景区，结合多年采选活动形成的排岩场等因素对矿区周边出现的相对低缓磁异常的有效评价产生了一定程度的制约。鉴于此，本文选择鞍本地区的弓长岭铁矿床作为已有矿山边部找矿突破的研究对象，剖析其内典型铁矿床的成矿地质特征和地球物理特征，解析其典型矿床的找矿地质—地球物理标志，形成相应的综合地质—地球物理找矿模型，以矿山高磁场背景下的相对低缓磁异常区域为重点，优选一矿区西南部的高家沟找矿远景区进行应用研究，准确识别定位隐伏铁矿体的存在，实现已有矿山深边部的找矿突破，为区内铁矿的找矿预测工作提供理论依据和实践指导。与此同时，并可借助已有矿山的生产能力，大幅度提高找矿的潜在经济效益和社会效益。

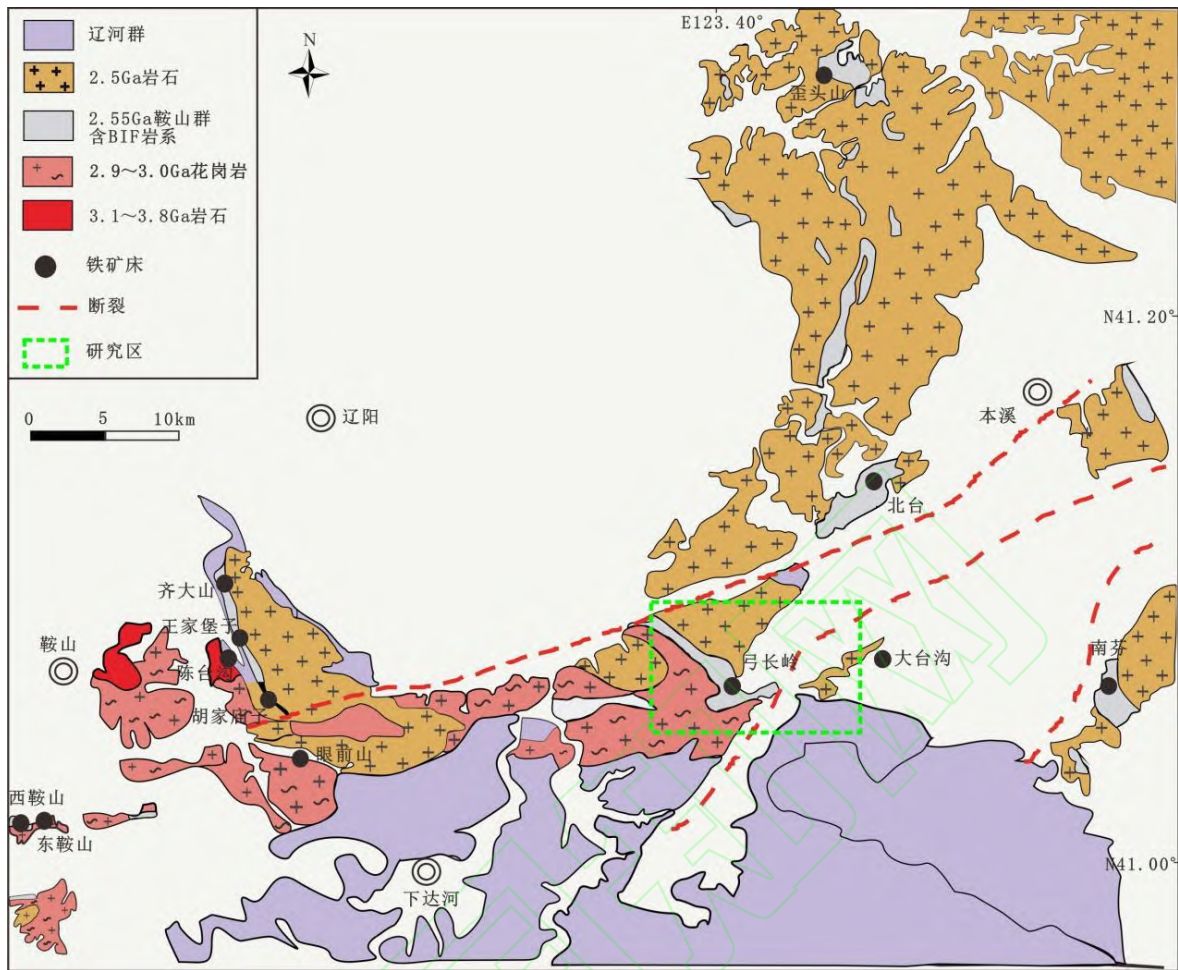


图1 鞍山-本溪地区地质简图（据沈其韩，1998 修改）

Fig.1 Geologic map of Anshan-Benxi area

1 弓长岭铁矿床成矿地质背景

鞍山地区位于华北板块（III-5），是我国最大的沉积变质型铁矿集中分布区，其内已发现的铁矿资源总量超过 200 亿吨（蒙嘉琪等，2024），分布有东鞍山、西鞍山、大孤山、胡家庙子、弓长岭、眼前山、齐大山、南芬、大台沟、思山岭、陈台沟等大型—特大型铁矿（图 1，张朋等，2012）。弓长岭铁矿床位于著名的鞍本铁矿带之中段。区内大面积分布弓长岭花岗岩，新元古代辽河群和太古宙鞍山岩群岩块呈大小不等的残留体，嵌浮于花岗质岩体中。

地层方面，弓长岭铁矿北部、西北部主要出露有古生界奥陶系、寒武系灰岩和页岩；北部分布有新元古界青白口系、南华系泥灰岩和石英砂岩、砂质页岩以及少量的新太古界鞍山群茨沟组地层；北东部广泛分布古生界寒武系泥灰岩、页岩、石英砂岩；南部呈带状出露新元古界南华系泥质灰岩、石英砂岩地层分布；南东部和西南部主要分布有古元古界辽河群各组地层；弓长岭矿区及附近主要出露太古界鞍山群地层，其呈大小不一的残留体状分布于太古代弓长岭花岗岩中，原岩属基性火山岩—硅铁质沉积岩建造（图 2）。

构造方面，区域地质构造复杂，褶皱和断裂构造发育。鞍山群、辽河群构造层组成一个近东西向展布的复背斜，主要的褶皱有弓长岭背斜、三道岭—下马塘背斜。主要的断裂有寒岭断裂、偏岭断裂、老岭断裂、三道岭断裂及东黄泥岗断裂。由于后期断裂构造发育，褶皱构造大多已遭受破坏，致使岩层残缺不全，或发生远距离错动。

岩浆岩方面，区域内广泛分布太古代晚期弓长岭花岗岩、中生代燕山期花岗岩及辉绿岩，多侵入鞍山群茨沟组地层，对铁矿层形成了不同程度的破坏，致使矿体之间相互分开，并使矿体上、下盘围岩发生了

花岗岩化及伟晶化。脉岩主要有长英岩脉、伟晶岩脉、石英脉、辉绿岩脉、透闪石英岩脉等。后期有伟晶岩、石英脉等岩脉侵入，零星分布于区域内。

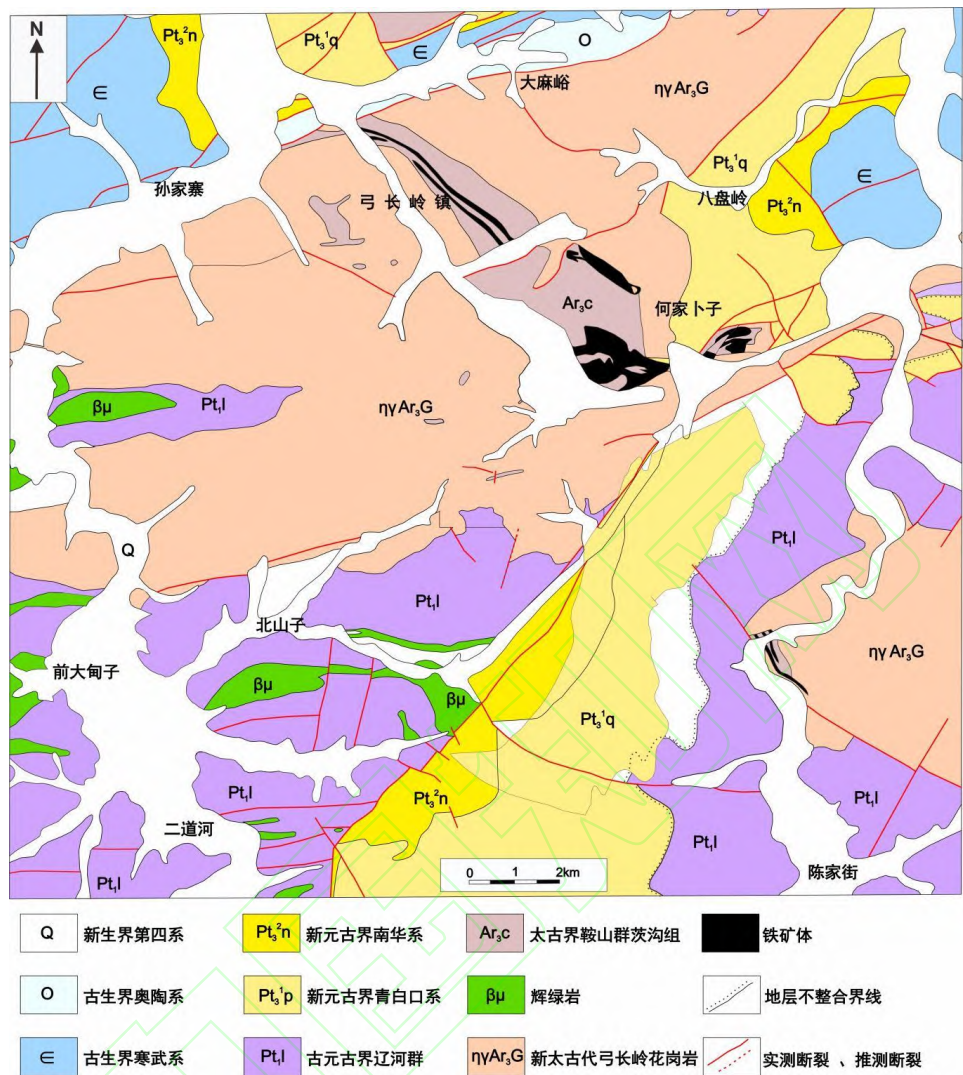


图 2 区域成矿地质简图（据区域地质资料，2003 修改）

Fig.2 The regional metallogenic geological map

2 典型铁矿成矿地质-地球物理特征

弓长岭铁矿床中分布有多个铁矿采区（图 3），具体为一矿区（何家铁矿）、二矿区（井下铁矿）、三矿区（西黄泥铁矿）、独木采区（老岭-八盘岭铁矿）等，其中以一矿区、二矿区铁矿最为典型。

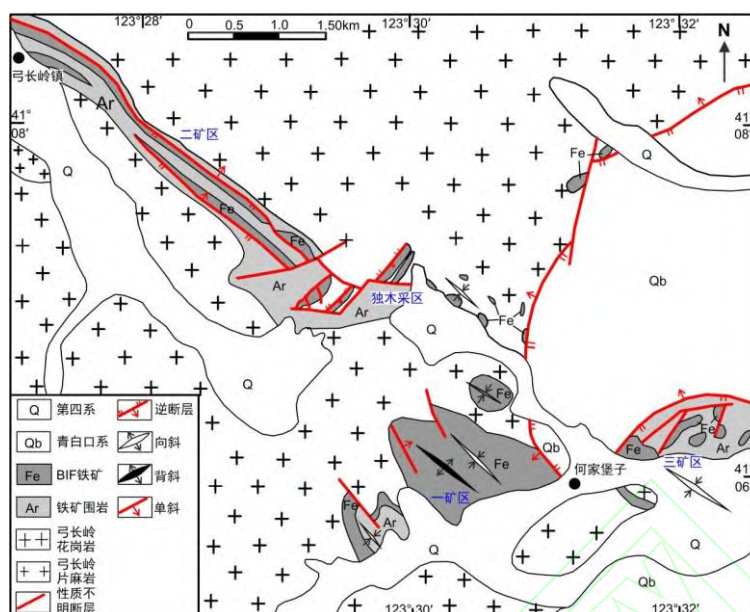


图3 弓长岭地区铁矿床空间分布地质简图(据朱凯等, 2016 修改)

Fig.3 The geological sketch of spatial distribution of iron ore deposits in Gongchangling area

2.1 成矿地质特征

2.1.1 二矿区（井下铁矿）

铁矿赋矿地层为新太古界鞍山群茨沟组，主要岩性为斜长角闪岩、黑云变粒岩、黑云角闪斜长片麻岩、角闪片岩、绿泥片岩、透闪片岩、黑云钠长变粒岩、二长浅粒岩和磁铁石英岩，属于一套受到低角闪岩相区域变质作用形成的变质岩。

铁矿受 NEE 向的寒岭断裂、偏岭断裂和 NE 向的老岭断裂带联合控制（图 2），在控矿构造带内，铁矿的矿层及其赋矿围岩呈单斜形态产出，两端受断裂影响，产状有些变化；褶皱构造不发育，断裂构造较发育，有走向断层和横向断层两类，其中走向断层控制着铁矿层，横向断层破坏矿体的连续性和完整性（图 4）。区内岩浆岩分布极为广泛，主要为弓长岭花岗岩，在采区两侧有大面积的出露，与鞍山群茨沟组地层呈交代接触，整个赋矿地层呈大的残留体存在于弓长岭花岗岩岩体内。

区内圈定 6 层铁矿层（图 4），呈层状、似层状产于鞍山岩群变质岩中，分为贫铁矿层及富铁矿层。贫铁矿层主要赋存于上下两个含铁带之中，下含铁带包括第一层铁矿（Fe1）和第二层铁矿（Fe2），两层铁矿中夹角闪片岩层；上含铁带中包括第四、五、六层铁（Fe4、Fe5、Fe6），第四与第五铁矿层中夹下斜长角闪片岩层，第五与第六铁矿层中夹上斜长角闪片岩层。在两个含铁带间黑云斜长变粒岩带中夹第三层铁矿（Fe3）。采区规模最大的矿层为第六层铁矿（Fe6），往下顺次为第二层铁矿（Fe2）、第四层铁矿（Fe4）、第一层铁矿（Fe1）、第五层铁矿（Fe5）、第三层铁矿（Fe3）。富铁矿层主要分布在第六层铁矿（Fe6）中，其次是第四层铁矿（Fe4）中，产状与贫铁矿层基本一致，呈层状或似层状，局部为复杂的薄层脉状，时有分枝现象，地表少，深部多，在采区均有分布。

区内铁矿石自然类型依据矿石的矿物成分、磁性特征及成因特征划分为 4 类：磁铁石英岩型、假象赤铁矿石型、磁铁富矿型和假象赤铁富矿型。其中磁铁石英岩是区内分布范围最广的铁矿石，主要组成矿物有磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿，非金属矿物有石英、角闪岩、阳起石、绿泥石等。磁铁富矿主要产在 Fe6 矿层中。

该区有六层铁矿，其上下盘围岩也不相同，矿层与围岩的接触关系，浅部多以断层接触为主，余者及深部认为整合关系。围岩分为未蚀变的围岩、弱蚀变围岩和强蚀变围岩，其中未蚀变围岩主要有斜长角闪岩、黑云变粒岩、大理岩、硅质岩等，弱蚀变岩主要是绿泥石化、阳起石化的斜长角山岩，强蚀变岩则为镁铁闪石岩、石榴石岩和绿泥石片岩等。

蚀变矿物有：镁铁闪石、石榴石、绿泥石、黑云母及磁铁矿等。本矿区绿泥石分布广泛，主要是铁镁

绿泥石、蠕绿泥石，与磁铁矿关系密切，绿泥石垂直磁铁矿物表面生长，反映绿泥石为后期热液产物（付海涛等，2016）。早期的绿泥石，组成层状绿泥片岩，多分布于底部片岩中或其它的变质岩层内。成矿前的绿泥石呈脉状交代原来的变质岩石：斜长角闪岩、角闪片岩、石英岩等，后又被磁铁矿富矿交代，成矿后的绿泥石呈脉状交代早期磁铁矿富矿。

蚀变岩中的磁铁矿多分布在靠近富矿体之处，一般与蚀变岩共生，呈完整的八面体或八面体的歪晶，或呈浸染状分布，或呈包体包于石榴石或镁铁闪石中，部分磁铁矿组成磁铁矿富矿体，呈致密块状。

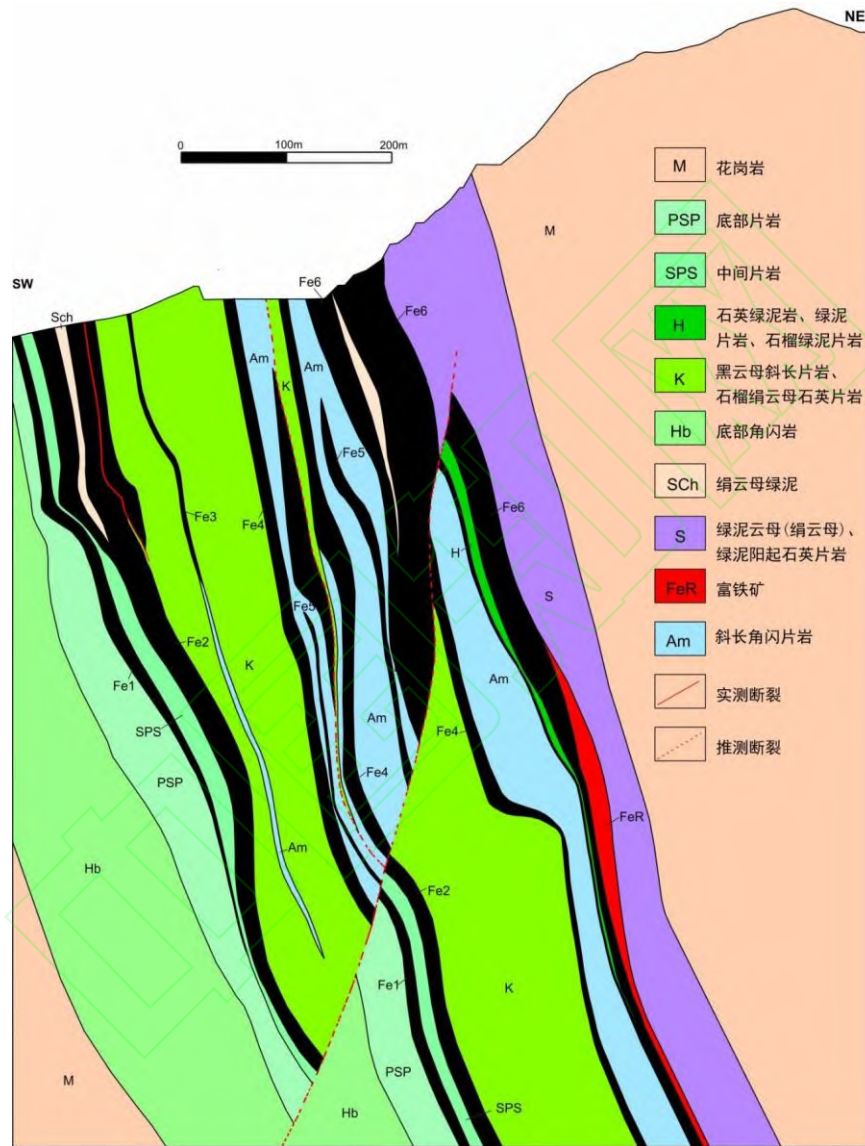


图4 弓长岭铁矿床二矿区铁矿典型地质剖面图（据矿区资料，2020 修改）

Fig.4 The typical geological profile of Gongchangling Iron ore deposit - 2 mining area

2.1.2 一矿区（何家铁矿）

一矿区位于二矿区的东南部，其赋矿地层为太古界鞍山群茨沟组，上部为斜长角闪岩、硅质粒岩层，中部为磁铁矿石岩与斜长角闪岩互层组成的含铁带，下部为石榴云母片岩、黑云斜长石英岩和斜长角闪岩。铁矿受 NE 向的老岭断裂带和 NEE 向的偏岭断裂联合控制，其内铁矿体的形态则主要受一系列褶皱构造控制，呈连续的背、向斜褶曲相互交替出现，由六个背斜和五个向斜构成开阔式舒缓波状复向斜构造，呈现出向南东缓倾斜的簸箕形。褶皱轴向北西，呈缓倾斜侧伏于南东，倾角较缓。岩浆岩方面，区内有大面积新太古代弓长岭花岗岩的侵入，导致整个赋矿地层遭受新太古代弓长岭花岗岩改造，呈捕虏体形式存于弓

长岭花岗岩中。

区内铁矿以贫铁矿体为主，局部赋存规模较小的富铁矿体，其铁矿体主要可分为 2 个（图 5）：Fe1 号、Fe2 号，在 Fe1、Fe2 号之间片岩层（K 层）之间见有规模较小呈零星分布的薄贫铁矿体。其中，Fe1 号铁矿体位于下部呈层状分布于全矿区，规模大，产状稳定，连续性好，矿石自然类型以磁铁石英岩为主。Fe2 号铁矿体位于 Fe1 号铁矿体上方，规模亦较大，产状和 Fe1 矿体基本一致，多出露于地表，但局部地段受断层切割或受花岗岩体侵入而有间断，矿石自然类型以假象赤铁石英岩为主。

区内铁矿石自然类型主要分为磁铁石英岩型和假象赤铁石英岩型。围岩主要为斜长角闪（片）岩、绿泥斜长角闪（片）岩，柘榴绢云母石英片岩，其次为绿泥片岩、绿泥绢云母石英片岩、绢云母石英片岩，局部地段与花岗岩接触。矿体周围的岩石存在明显的围岩蚀变，以绿泥石化为主，蚀变矿物有镁铁闪石、石榴石、绿泥石、黑云母、磁铁矿等，主要蚀变岩石有绿泥片岩、石榴石绿泥岩、石榴镁铁闪岩、绿泥石化石榴镁铁闪岩等。

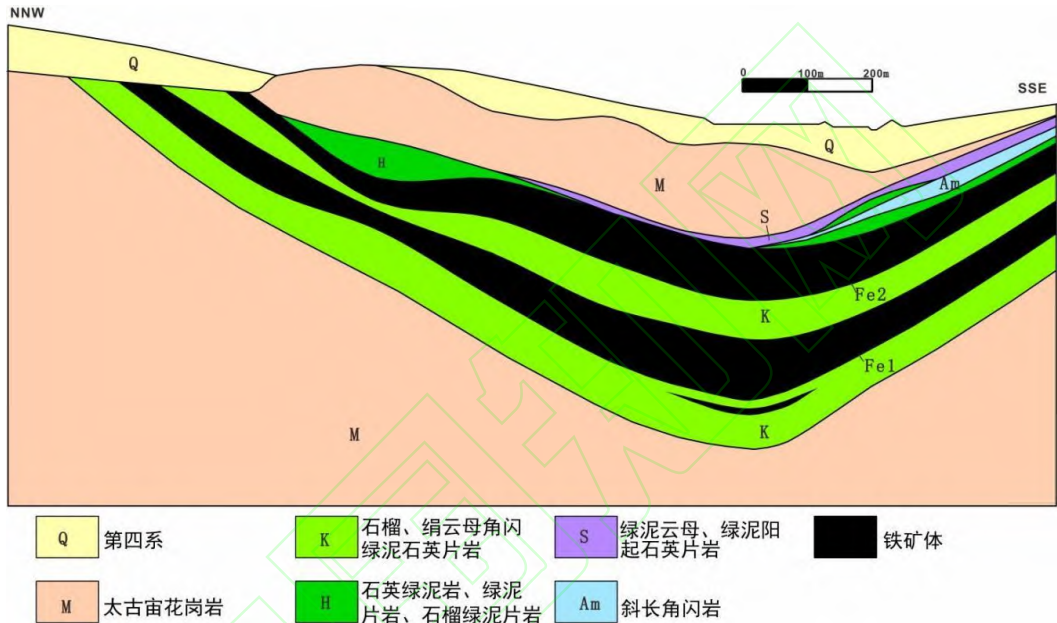


图 5 弓长岭铁矿床一矿区铁矿典型地质剖面图(据矿区资料，2020 修改)
Fig.5 The typical geological profile of Gongchangling Iron ore deposit - 1 mining area

2.2 地球物理特征

2.2.1 磁异常特征

2.2.1.1 航磁异常特征

弓长岭铁矿床的矿石主要为磁铁石英岩，具有明显的高磁正异常特征（图 6），二矿区航磁异常呈北西-南东带状展布，异常长 5000 m，宽 500 m，磁异常与矿体吻合。异常强度很大，异常强度极值在 10000nT 以上，异常西南侧梯度变化较陡，北东侧梯度比较缓，在磁异常东南部，异常北东翼等值线变得宽缓，范围较大；其它矿区的磁异常则显得零乱，主要呈近似椭圆状展布的正异常，由多个局部异常组成，异常的长轴方向多样，异常强度极值在数千 nT 左右。

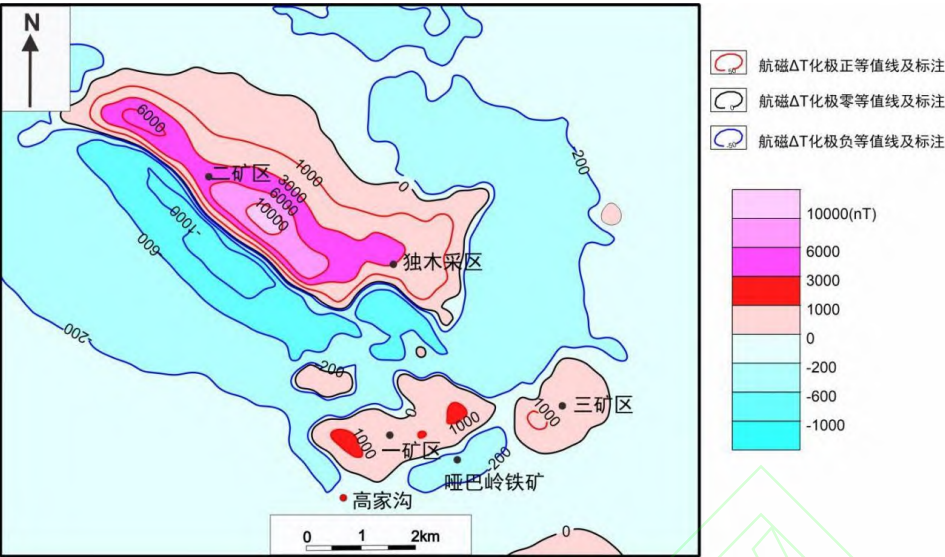


图 6 弓长岭地区航磁 ΔT 化极等值线简图(据航空磁放资料，2020 修改)

Fig.6 The schematic map of aeromagnetic ΔT polarization contour in Gongchangling area

2.2.1.2 地面高精度磁测异常特征

(1) 岩矿石物性参数特征

磁化率上，赋矿围岩磁化率微弱（磁化率 $<1510\times10^{-6}\times4\pi\cdot\text{SI}$ ），磁铁矿磁化率分布于 $480\sim1300000\times10^{-6}\times4\pi\cdot\text{SI}$ ，赤铁矿磁化率分布于 $700\sim500000\times10^{-6}\times4\pi\cdot\text{SI}$ ，富矿与贫矿的磁化率和剩余磁化强度均有几倍差异，而围岩都是弱磁性的；密度上，赋矿围岩密度多在 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 左右，而铁矿石密度均在 $3.3\text{g}/\text{cm}^3$ 以上。磁铁矿石与围岩相比存在明显的磁化率和密度差异，磁异常可以准确反映铁矿体的位置和形态（付海涛等，2016），可以采用地面高精度磁法识别隐伏的铁矿体。

表 1 弓长岭铁矿床岩石磁性参数表（冶金部物探公司航测二队，1975）

Table 1 The table of rock magnetic parameters of Gongchangling iron ore deposit

采区	岩矿石类型	块数	磁化率 ($10^{-6}\times4\pi\cdot\text{SI}$)		余磁强度 J_r ($\times10^{-3}\text{A}/\text{m}$)	
			变化范围	平均值	变化范围	平均值
一、二、三矿区 及哑叭岭铁矿	磁铁矿	181	1000-1300000	130000	500-100000	8000
	磁铁富矿	7	331000-1310000	550000	7000-20000	11500
	磁铁贫矿	12	30000-60000	116000	4000-60000	16000
	赤铁矿	156	1000-500000	31000	400-60000	4600
	赤铁富矿	8	2300-324000	64000	700-60000	16400
	赤铁贫矿	71	700-200000	24400	100-900000	7800
	绿泥片岩	20	磁性微弱			
	云母片岩	15	磁性微弱			
	角闪岩	20	磁性微弱			
	混合岩	20	磁性微弱			
独木采区	磁铁富矿	35	1200-320700	142000	9500-254000	34000
	磁铁贫矿	39	480-123200	58000	1780-184000	8000
	赤铁富矿	26	18000-185000	79200	2470-83300	23000
	赤铁贫矿	30	33000-317000	61000	4000-380000	25300
	含铁石英绿泥岩	8	0-41600	10660	0-11800	2300
	角闪岩	24	20-1510	420	30-4700	110
	绢云母石英片岩	20	磁性微弱			
	石英岩	12	磁性微弱			
	混合岩	49	磁性微弱			
	页岩	19	磁性微弱			
	石英绿泥片岩	12	磁性微弱			
	千枚岩	10	磁性微弱			

(2) 地面高精度磁异常特征

弓长岭铁矿床已知铁矿体与其地面高精度磁异常空间分布一致，异常规模比较大，与航磁异常吻合；其中二矿区地面高精度磁异常规模最大，中间为东宽西窄、北西走向的带状异常（付海涛等，2016），磁异常强度多在 10000nT 以上；一矿区地面高精度磁异常由多个局部异常组成，强度多在 5000nT 以上，局

部达到 10000nT 以上；一方面显示该矿床铁矿规模大，呈现条带状的分布特征，另一方面显示铁矿体主要以埋藏浅的露头矿为主。

2.2.2 重力异常特征

1：200000 布拉格重力异常图（图 7）显示弓长岭铁矿床位于负重力异常中心，而在剩余重力异常图上则位于一处 NW 向分布的局部高重力异常范围内。但由于重力异常比例尺过小，中小型铁矿体反应不明显（崔培龙，2014）。

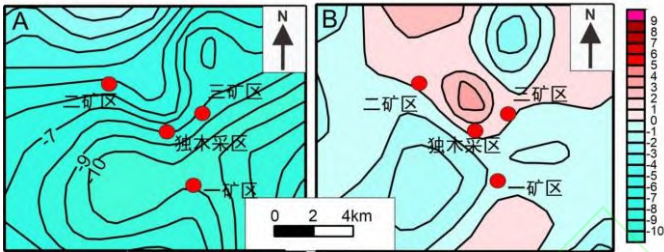


图 7 弓长岭地区布格重力等值线简图(据崔培龙，2014 修改)

Fig.7 The schematic diagram of Bouguer gravity contour in Gongchangling area

(A) 布格重力平面图；(B) 剩余重力平面图

3 弓长岭铁矿找矿地质—地球物理综合模型

3.1 找矿标志

通过对弓长岭铁矿床典型采区：一矿区和二矿区的成矿地质—地球物理特征分析研究，结合前人对该区的系统研究成果和找矿实践，得出弓长岭铁矿床的总体找矿标志为：

- (1) 铁矿均赋存在新太古代鞍山群茨沟组地层中；
- (2) 铁矿均位于 NEE 向寒岭断裂、偏岭断裂与三道岭断裂所控制的区间内；
- (3) 铁矿的赋矿地层均遭受新太古代弓长岭花岗岩改造，呈大小不一的捕虏体；
- (4) 铁矿体赋矿围岩基本上均发育不同程度的绿泥石化，并多形成绿泥片岩包裹铁矿体，绿泥石化可作为间接找矿标志；
- (5) 磁异常上，铁矿体与磁异常吻合性好，高磁正异常区域是重要的找矿标志；
- (6) 重力异常上，铁矿体多位于高重力异常范围内。

3.2 构建综合找矿模型

3.2.1 成果问题转化

弓长岭铁矿床已知铁矿体为赋存在新太古代鞍山群茨沟组地层中隐伏矿体，赋矿地层遭受新太古代弓长岭花岗岩改造，呈大的残留体存在于弓长岭花岗岩岩体内；找矿要解决的地质问题是在相对低缓航磁异常内了解、定位地下茨沟组位置、顶底面延伸情况，从而解决鞍本地区高磁异常背景区中的隐伏铁矿找矿技术难题，将地质问题则可能转化为物理问题。

3.2.2 模型构建的步骤

3.2.2.1 圈定远景区

集成地质-地球物理数据资料，系统分析研究圈定已有铁矿山边部相对低缓航磁异常带为找矿远景区。

3.2.2.2 野外工作方法

在地质测量、地面高精度磁法测量工作基础上开展钻探验证工作。

首先于调查区内开展中大比例尺的地质测量工作，提取、梳理地质要素，初步查明区内地层、构造、岩浆岩分布特征，编制地质图件。其次开展全区的中大比例尺的地面高精度磁法测量工作，结合大比例尺的磁法剖面测量工作进行正反演，圈定并综合解译磁异常；推测“盖层”的掩覆厚度、定位磁性地质体埋深、形态、规模、产状等特征后酌情布设钻探工程进行深部验证及综合评价工作。

3.2.3 模型假设与优选

集成、剖析一矿区、二矿区成矿地质、物理特征，总结铁矿找矿标志，依据各类岩石的物理性质，进行模型假设：根据重力测量结果，构建地质+重力模型，根据岩矿石磁性参数，构建地质+磁法模型；结合前人对该区的系统研究成果和找矿实践，综合优选采用地质+物探地面高精度磁测为主，辅以重力测量为手段构建找矿模型对已知铁矿山边部隐伏铁矿体进行探测。本区铁矿综合找矿模型为表 2 所示。

表 2 弓长岭铁矿床综合找矿模型

Table 2 The comprehensive prospecting model of Gongchangling iron deposit

找矿方法类型	标志分类	弓长岭铁矿
地质要素标志	赋矿地层	新太古代鞍山群茨沟组
	构造位置	寒岭断裂、偏岭断裂与老岭断裂之间
	控矿构造	单斜构造或多级褶皱
	蚀变矿化类型	绿泥片岩包裹磁铁矿或赤铁矿
	岩浆岩	呈捕掳体存在于弓长岭花岗岩体内
地球物理异常标志	航磁异常	明显的高磁正异常特征
	地面高精度磁异常	存在明显磁异常特征
	重力异常	重力异常特征明显

4 弓长岭铁矿床中隐伏铁矿找矿技术方法

对于弓长岭铁矿床中隐伏铁矿的找矿技术方法，主要基于对弓长岭地区典型铁矿床的成矿地质特征和地球物理特征，提出找矿标志，构建找矿模型，对于弓长岭铁矿床中隐伏铁矿运用综合地质—地球物理找矿方法开展隐伏铁矿找矿工作。

4.1 圈定找矿远景区

基于弓长岭铁矿床综合找矿模型，集成 1：50000 地质图（附图 3）及 1：50000 航磁异常图（附图 6）成果，结合开展野外异常查证工作，进行梳理、研究，于弓长岭铁矿床外围圈定找矿远景区，如：辽宁省辽阳市弓长岭区高家沟铁矿找矿远景区。

4.2 找矿靶区优选

（1）首先于圈定的找矿远景区内开展 1：10000 地质测量工作，地质测量与重点解剖相结合，宏观与微观相结合，以岩性-构造-蚀变为识别元素进行梳理、提取、甄别成矿地质要素，初步查明区内地层、构造、岩浆岩分布特征，编制地质图件。

（2）基于地面高精度磁异常与航磁异常数量级的差异，并在空间尺度上把航磁异常显示的相对低缓异常转化为潜在隐伏铁矿体的地面高精度磁异常显示，于圈定的找矿远景区内开展 1：10000 地面高精度磁法测量工作对岩矿石进行磁性数据采集，通过金维地学信息处理研究应用系统(GeoIPAS4.6)对数据进行化极、延拓等工作圈定地面高精度磁异常区；囊括 1：10000 地质测量成果认识进行调查并对其进行解译，综合进行找矿靶区优选。

①选择加拿大产 GSM-19 型高精度质子旋进磁力仪结合手持 GPS 采集岩矿石磁性数据，自动记录野外实测数据，并利用计算机回放野外实测数据。

②1：10000 地面高精度磁法测量野外工作包括包括基点的选取、日变站和校正点的设立、日变站的观测、校准点的观测以及地磁普通测点的观测。

4.3 工程验证

依据地球物理异常特征，于找矿靶区内重点区段开展穿越式的 1：2000 地面高精度磁法剖面测量工作，结合正反演计算进行综合分析，定位识别隐伏铁矿体的空间存在位置及形态，并进行钻探验证。

使用金维地学信息处理研究应用系统(GeoIPAS4.6)软件将绝对磁力值(T_{abs} 、公式 1)、磁力异常值(ΔT 、公式 2)以及高度改正值(T_g 、公式 3)进行正反演拟合等工作消除斜磁化的影响及压制局部地面干扰，比较真实可靠的反映磁性体形态、埋深、形态、规模、产状等特征等。

$$T_{abs} = T_p - T_i' + T_0' \quad (\text{公式 1})$$

式中： T_{abs} —测点的绝对磁力值，单位为纳特（nT）；

T_p —测点的磁力观测值，单位为纳特（nT）；

T_i' —第 i 时刻日变站的观测值，单位为纳特（nT）

$$\Delta T = T_{abs} - T_0 + T_g \quad (\text{公式 2})$$

式中： ΔT —磁力 ΔT 异常值，单位为纳特（nT）；

T_0 —测点处正常场值，单位为纳特（nT）；

T_g —高度改正值，单位为纳特（nT）。

$$T_g = \frac{3T_0}{R} \Delta h \quad (\text{公式 3})$$

式中： T_g —高度改正值，单位为纳特（nT）；

T_0 —测点正常场值，单位为纳特（nT）；

R —地球平均半径，取 6371200m；

Δh —测点海拔高程与日变站高程之差，单位为米（m）。

4.4 综合研判

依据钻探工程验证结果对找矿模型进行综合评价。

5 高家沟铁矿找矿远景区找矿预测应用实例研究

5.1 圈定找矿远景区

在弓长岭铁矿床基础地质矿产资料和矿产勘探资料分析研究基础上，依据建立的地质—地球物理找矿模型和有关找矿标志，选择一矿区西南部、哑巴岭铁矿西部的高家沟区域作为找矿远景区（图 2）。高家沟铁矿找矿远景区构造位置上处于寒岭断裂、偏岭断裂之间，控矿构造上属于一矿区多级控矿褶皱向南部的延伸隐伏发育端。区内出露的地层主要为鞍山群茨沟组，呈捕虏体赋存于太古代弓长岭花岗岩中。在 1：50000 航磁异常图上，区内有高磁正异常区向西南部延伸快速尖灭的局部相对低缓航磁异常内（图 6）。本着就矿找矿的原则，一矿区已知铁矿体西南部的延深区，是最佳的找矿远景区。

5.2 找矿靶区优选与隐伏铁矿体的定位识别

在高家沟铁矿找矿远景区内，基于航磁异常规模和强度与地面高精度磁测磁异常差异，特别是铁矿石与围岩相比存在巨大的磁性参数差异（表 1），对低缓航磁异常开展 1：10000 的地面高精度磁法测量工作，对其进行放大和精细刻画；对获取的磁测数据进行系统处理，得到高家沟铁矿找矿远景区的地面高精度磁法测量异常分布图（图 8）。选取孙家寨村后小欲南侧树林垂直距离约 100m 处作为基点，此处磁场平稳且不受人文干扰，经过长时间观测，并选取 3 个小时以上磁场平稳的一段记录求取平均值 $T=53997.4\text{nT}$ 作为基本磁场值，通过统计圈闭较好的正磁异常值进行均值计算 $\Delta T=+400\text{nT}$ 作为本区明显异常取值的依据，即 $\Delta T=+400\text{nT}$ 为磁异常拾取阈值，可见出现 10 处局部磁异常大于 $+400\text{nT}$ 的区域，其中 H1 号异常紧邻何家铁矿西部；H2、H3、H4、H5 和 H7 比较集中，主要分布于北西区域，磁异常最大值 $506.8866\sim 773.2125\text{nT}$ 不等；H6 号异常紧邻一矿区南边和哑巴岭铁矿西边，磁异常规模最大，磁异常值在 600nT 以上；H8、H9、H10 号异常主要分布于南西区域，磁异常最大值 $420.2487\sim 690.2001\text{nT}$ 。

H6 号磁异常区地质上处在一矿区南部延深区和哑巴岭铁矿西部延深区的复合部位，成矿地质条件优越，又具有明显的地面高磁正异常，是高家沟区内最佳的找矿靶区。鉴于此，在 H6 找矿靶区内开展近南北向的 1：2000 的磁法剖面测量工作，并对磁法剖面测量成果进行系统的正反演处理定位隐伏矿体（于仕祥等，2014；杨建华等，2020），本次以一矿区矿体向南部延深规律为地质约束对磁法剖面测量进行正反演拟合计算分析，识别潜在隐伏铁矿体的存在并对其进行定位（图 9），其中 1 号异常体推测为一矿区已知矿体 Fe2 的延深，2 号异常体推测为一矿区已知矿体 Fe1 的延深。

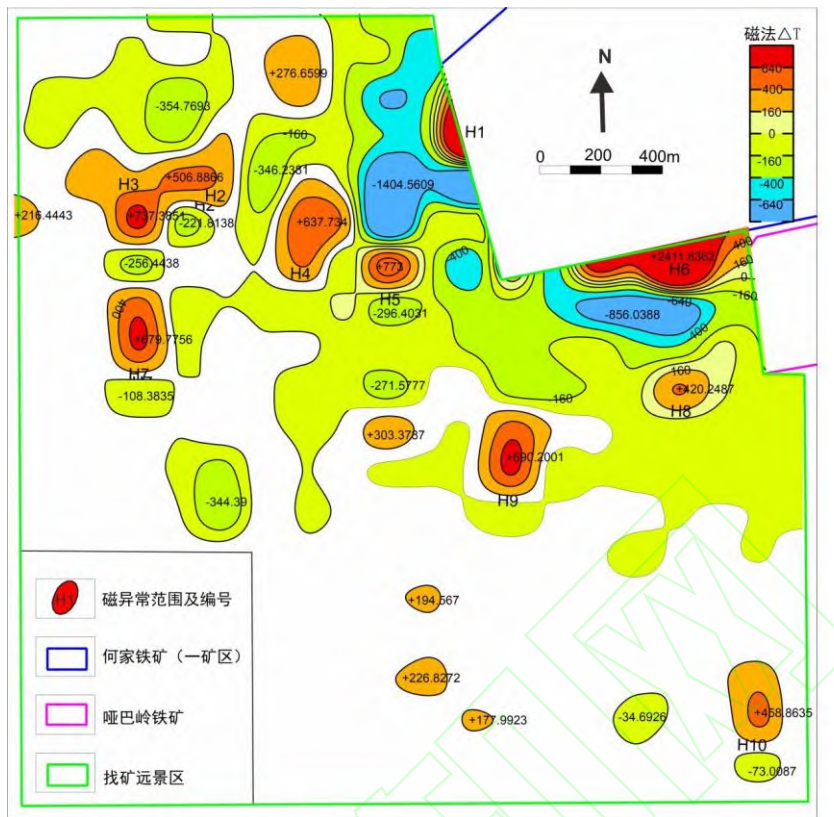


图 8 高家沟找矿远景区 1：10000 地面高精度磁测异常分布图（李飞等，2024 修改）

Fig. 8 The anomaly distribution map of 1：10000 surface high-precision magnetic survey in Gaojiagou prospecting prospect area

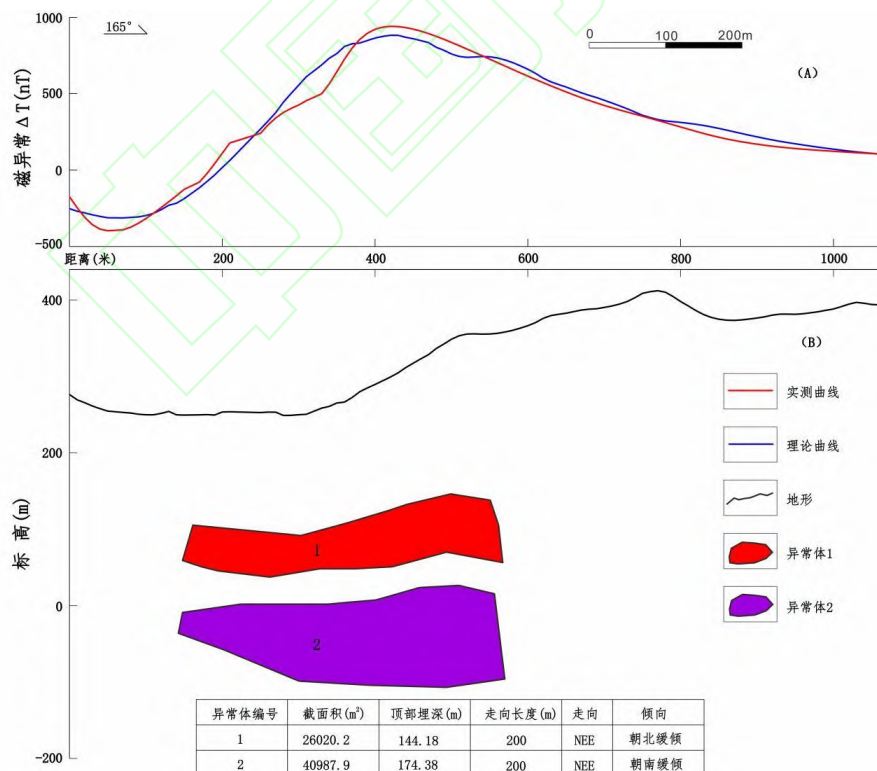


图 9 H6 找矿靶区磁测剖面二度半反演成果图（贾三石等，2024 修改）

Fig.9 2.5D inversion result of magnetic survey profile of H6 prospecting target area

(A) 实测曲线和理论曲线拟合图; (B) 二度半反演模型图

5.3 钻探验证下的弓长岭铁矿床找矿预测研究探析

在 1:2000 磁法剖面测量正反演处理成果基础上,进行了钻探工程验证(图 10),发现三层铁矿体 Fe1、Fe2 和 Fe3,其中 Fe1 号铁矿体埋深在 168.50~225.58 m,真厚度 43.53 m;Fe2 号铁矿体埋深在 232.14~326.91 m,真厚度 77.26 m;Fe3 号铁矿体埋深在 337.64~345.38 m,真厚度 5.34 m。结合前述一矿区的地质资料可知,高家沟区 Fe1 号铁矿体为一矿区已知铁矿体 Fe2,Fe2 号铁矿体为一矿区已知铁矿体 Fe1,而 Fe3 号铁矿体则为一矿区已知的未编号的层间小矿体。利用钻探验证成果和磁异常的圈闭面积,估算该处隐伏铁矿资源量在千万吨以上,达到了中型铁矿的规模。由此可知,在鞍本地区已有铁矿深边部开展找矿预测研究工作,可以发现前期开采矿山强磁场影响下的边部隐伏铁矿体,提高了找矿效益,眼前山铁矿边部的找矿成果也说明了这一点(闫迪等,2024)。与此同时,由于鞍本地区从太古代到新生代,经历了多期次的构造运动,不同程度地造成了铁矿体的错断隐伏或出露地表,特别是在已有铁矿床周边存在数量不等的大型隐伏铁矿床,其磁异常强度明显小于周边出露的铁矿床,如近些年探明的陈台沟和张家湾铁矿(于仕祥等,2013;任群智,2011),以及齐大山铁矿边部正在持续地质勘探的祁家沟铁矿等。

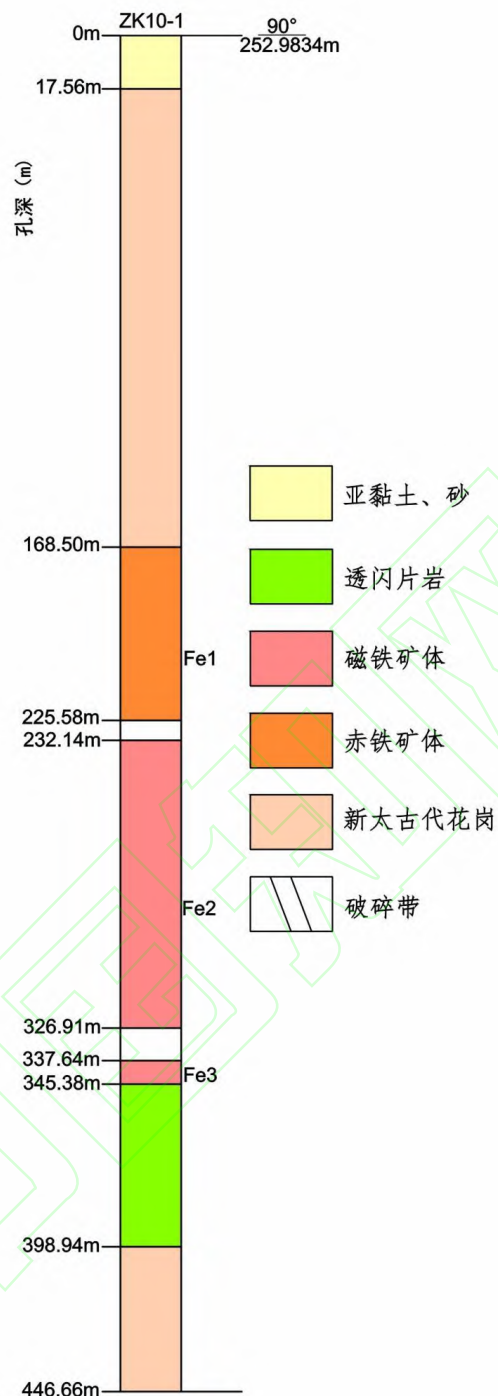


图 10 ZK10-1 钻孔验证地质剖面图（李飞等，2024 修改）

Fig.10 The geological section map from the validation by drilling ZK10-1

5.4 综合分析

5.4.1 数据误差分析及处理

本次选择一矿区西南部、哑巴岭铁矿西部的高家沟区域作为找矿远景区，区内有一些采选活动场地的存在，对磁法数据的采集会产生一定的影响，本次使用加拿大产 GSM-19 型高精度质子旋进磁力仪进行数据采集，使用前对磁力仪进行性能试验：噪声水平测定，观测精度测定，系统误差测定，一致性测定，探头一致性测定，主机一致性测定，确保其工作状态良好，并减小测量结果的偏差。

野外工作对基点、日变站、校正点设立及观测，以及地磁普通测点观测前去除随身携带磁性物品，采用仪器校正点—观测点—仪器校正点的闭合方式进行，采用单探头读取两个观测值，当两次读数之差

于 1nT 时，记录最后一个观测值；野外观测时，在观测过程中，操作员随时注意观测信号强度，当信号强度低于 95 时，应进行重复观测，当两次读数之差不大于 1nT 时，再进行存储和记录，记录最后一个观测值，可以减小测量误差，并提高数据的准确性；在观测过程中，操作员随时注意磁场值的变化，遇到相邻点之间磁场值变化较大时，操作员均进行了重复观测，并计算平均值和标准差，以减小随机误差的影响。在可能的情况下，结合多种不同的测量方法，以增加数据的可靠性和准确性。

采用“一同三不同”方法进行质量检查，尽可能做到每个主要工作单元布设至少一个检查点，检查观测的直接差应小于设计检查观测精度的 2.5 倍，提高数据的准确度。

表 3 磁测日变站选择试验结果表

Table 3 The table of magnetic diurnal variation station selection test results

探头高度	日变站 RBZ-01	东	东南	南	西南	西	西北	北	东北
2m	54042.36	54042.20	54042.16	54043.12	54042.87	54042.14	54042.59	54042.17	54042.21
试验结果可以看出，日变站 NA01 处的磁场值为 54042.36nT，在日变站半径 2m 范围内磁场变化量最大为 0.76nT，在高差 0.5m 范围内磁场变化量最大为 0.6nT，符合要求。									

表 4 磁测校正点选择试验结果表

Table 4 The table of magnetic calibration point selection test results

探头高度	校正点 JZ01	东	东南	南	西南	西	西北	北	东北
2m	54043.30	54042.44	54042.86	54043.10	54043.88	54043.27	54043.56	54043.18	54043.07
试验结果可以看出，校正点 JZD-01 处的磁场值为 54043.30nT，在日变站半径 2m 范围内磁场变化量最大为 0.86nT，在高差 0.5m 范围内磁场变化量最大为 0.63nT，符合要求。									

表 5 磁测误差分配表

Table 5 The table of magnetic measurement error distribution

野外观测均方差(nT)				
总计	检查观测	仪器一致性误差	仪器噪声误差	日变改正误差
1.57	0.84	0.87	0.27	0.97

5.4.2 数据误差对找矿预测结果的影响

本次选择具有较高精度和准确度的仪器设备，定期进行仪器的校正和校准，确保其工作状态良好；进行多次重复测量，并计算平均值和标准差，在可能的情况下，结合多种不同的测量方法，不断完善数据的质量和精度。多种提高数据精度的方法的使用对找矿预测的影响很小；数据的采集真实可靠。

5.4.3 地磁与航磁交叉验证

鞍本地区已知铁矿体以 BIF 型铁矿为主，与磁异常的耦合关系明显，本次找矿预测应用实例的研究是为了验证航磁局部低缓异常选择地面高精度磁法测量及磁法剖面测量工作进行钻探深部验证，并发现了深部隐伏铁矿体的存在；未进行航磁数据的收集，以至于未选择航磁数据进行交叉验证。

5.4.4 综述

鞍本地区作为国内 BIF 型铁矿最发育的地区之一，含矿建造遍布全区，地表出露有数量和规模不等的铁矿床，显示出了较高的磁异常特征，形成了高背景磁异常区，导致大量隐伏铁矿航磁异常特征不明显，特别是在已有铁矿边部的隐伏铁矿体。为此，可针对鞍本地区典型铁矿的成矿地质—地球物理特征，提取找矿标志，构建综合地质-地球物理找矿模型，利用大比例尺的地面高精度磁异常对小比例尺的航磁异常的放大和分离功能（张亚东等，2014；王海鹏等，2019；丁志强等，2021），可实现对鞍本地区已有铁矿山边部的相对低缓航磁异常范围内所反映隐伏铁矿体的识别定位。

6 找矿技术方法的潜力讨论

6.1 潜力分析

以鞍本地区典型铁矿山构建成矿地质—地球物理特征综合找矿预测模型，在已有铁矿边部的相对低缓

的航磁异常范围内开展地面高精度磁法测量工作基础上,耦合地质测量成果为约束条件对大比例尺磁法剖面测量进行正反演拟合计算分析,识别潜在隐伏铁矿体的存在并对其进行定位,以钻探工程对其深部验证,并以弓长岭地区高家沟铁矿找矿预测应用研究为例,成功的发现隐伏铁矿体的存在,并估算资源量在千万吨以上,达到了矿山增储增量的目的,特别是由于鞍本地区铁矿与航磁异常对应性较好,具有明显的高磁正异常特征,但作为铁矿赋矿地层鞍山群茨沟组遭受新太古代弓长岭花岗岩改造,呈捕虏体形式存于弓长岭花岗岩中,或出露于地表或为隐伏矿体,隐伏矿体其磁异常强度受覆盖层的影响而明显小于周边出露的铁矿床,也证明了本次找矿预测工作构建的找矿模型、采用的技术流程和方法组合在鞍本地区已知铁矿床外围具有较高的实用性和科学合理性,甚至对其它地区的已知 BIF 型铁矿边部、深部的隐伏铁矿体的找矿预测工作都有一定的借鉴意义。

6.2 综合模型的可操作性及改进方向

鞍本地区的铁矿石自然类型主要分为磁铁石英岩型和假象赤铁石英岩型,具有不同程度的磁性,所以本次找矿综合模型的建立以地面高精度磁测为主,耦合地质测量对发现的 BIF 型铁矿具有定向的指导意义。对于复杂地质条件下的 BIF 铁矿应该同样可以进行定位识别,具有一定的适用性,或辅以重力测量进行多条件的约束识别。

但对其他不同金属矿山外围的隐伏矿体的找矿预测有待验证,或有一定的指示意义。建议针对其它金属矿产边部隐伏矿体的探测耦合其它工作手段进行多条件约束对隐伏矿体进行定位识别;如针对隐伏的金、银等有色金属矿体或老矿山外围,酌情选择激电中梯测量工作、激电测深工作、大地电磁测深或浅井等手段建立综合找矿模型或三维地质模型,对隐伏体进行定位识别和验证。

7 结论

弓长岭铁矿床成矿地质条件优越,找矿潜力巨大。通过对弓长岭地区隐伏铁矿代表高家沟铁矿找矿预测系统研究,可以得出如下结论:

(1) 弓长岭铁矿床赋矿地层为新太古代鞍山群茨沟组,其内铁矿床受两组近平行的 NEE 断裂构造寒岭断裂、偏岭断裂联合控制,铁矿体沿单斜构造或多级褶皱延深分布,以磁铁矿为主,蚀变以绿泥石化为主。

(2) 基于弓长岭铁矿床中典型铁矿一矿区和二矿区的成矿地质特征和地球物理特征构建了本区隐伏铁矿的找矿模型,形成了针对鞍本地区已有铁矿边部隐伏铁矿的找矿技术方法,达到对航磁异常背景区中低缓磁异常所反映隐伏铁矿的识别定位。

(3) 以弓长岭地区高家沟铁矿找矿预测应用研究为例,进行了找矿远景区圈定、找矿靶区优选、隐伏铁矿体定位识别和钻探工程验证,发现了一矿区南部延深发育的隐伏铁矿,其估算资源量在千万吨以上。

(4) 本次找矿预测工作构建的找矿模型、采用的技术流程和方法组合在鞍本地区已知铁矿床外围具有一定的实用性和科学合理性,多方法手段的耦合也算一种创新方法。

(5) 实现已有矿山深边部的找矿突破,为区内铁矿的找矿预测工作提供理论依据和实践指导。与此同时,并可借助已有矿山的生产能力,大幅度提高找矿的潜在经济效益和社会效益。

References

- Cui P L, Sun J G. 2014. Metallogenic Tectonic Setting, Metallogenic and Prospecting Models for Precambrian Iron-Formation in the Anshan-Benxi Area [D]. Ph.D Thesis of Jilin university.
- Ding Z Q, Cui Z Q, Meng Q M, et al. 2021. Application of ground comprehensive geophysical and geochemical method on airborne magnetic anomaly verification-aeromagnetic anomaly in Yijianwan area[J]. COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION, 43(4): 494-500.
- Fu H T, Wang E D, Liu L S, et al. 2016. The ore-controlling conditions and exploration model of the sedimentary metamorphic iron deposits in the Anben area[M]. Shenyang: Liaoning People's Publishing House.
- Hao Z X, Yang Z Y, Chen L, et al. 2020. Research on the prediction of BIF-type iron ore formation in the hidden area of Dongfu Mountain, Zaozhuang, Shandong[M]. Resource Utilization and Ecological Environment - Proceedings of the 16th East China

- He P.2022.THE APPLICATION OF HIGH PRECISION MAGNETIC SURVEY TO EXPLORATION OF HETAOYUAN FE DEPOSIT IN JUYE, SHANDONG[J].Yunnan Geology, 41(1): 118-124.
- Lv S, Li Y K , Xu M, et al.2024.Application of high-precision magnetic measurement in the exploration of hidden magnetite deposits:A case study of Caozhuangzi area in Qian'an of the eastern Hebei Province[J].GEOLOGICAL SURVEY OF CHINA, 11(4): 26-32.
- Li H M, Li Y H, Li L X, et al.2022.Ore-forming conditions of the sedimentary metamorphic iron deposit and metallogenesis of the high-grade iron deposit[J].ACTA GEOLOGICA SINICA, 96(9): 3211-3233.
- Li Z Y, Li S, Ban Y C.2015.Application of high precision magnetic survey in the exploration of Yushu Iron mine in Xinbin County, Liaoning Province[J].Technology and Enterprise, 11(106): 120-121.
- Liaoning Non-ferrous Geological Exploration and Research Institute Co, Ltd.2024.Survey Report on Gaojiagou Iron Mine in Gongchangling District, Liaoyang City, Liaoning Province [R] .
- Liaoning Provincial Metallurgical Geological 404 Team Co, Ltd.2020.Geological Report on Production and Exploration of the West Side of Hejia Mining Area in Gongchangling Open pit Iron Mine [R] .
- Liaoning Provincial Metallurgical Geological 404 Team Co, Ltd.2020.Verification Report on Iron Ore Resource Reserves in Gongchangling Second Mining Area, Liaoyang City, Liaoning Province [R] .
- Meng J Q, Wang Z M, Jia S S, et al.2024.Delineation of Sedimentary Metamorphic Rich Iron Ore Bodies Based on Geophysical Techniques:Case Analysis of Qidashan Iron Ore in Anshan, Liaoning[J].GEOSCIENCE, 38 (1) : 87-97.
- Ren Q Z.Study on geological characteristics of iron ore deposits and buried ore prospecting in anshan region[D]. Ph.D Thesis of Northeastern University, 2011.
- Shen Q H.1998.Geological characteristics and geological background of Early Proterozoic banded iron formations in the North China Platform[M]//Cheng Qiyu.Collection of papers on the early Proterozoic geology of the North China craton.Beijing: Geological Publishing House.
- Shen Q H, Song H X.2015. Progress, prospecting and key scientific problems in origin researches of high-grade iron ore of the banded iron formation(BIF) in the North China Craton[J].Acta Petrologica Sinica, 31(10):2795-2815.
- Su S X, Song S Q, Wei M J.2022.Application of comprehensive geophysical prospecting method in the exploration of Geda deep hidden iron deposit, Jiyuan City, Henan Province[J].MINERAL EXPLORATION, 13(08): 143-149.
- Tian W F, Hao J J, Yan J Y, et al. 2010.Application of synthetic geophysical methods to deep exploration of Hanxing-type iron deposit[J].Progress in Geophys, 25(4):1442-1452.
- Wang H P, Chen X N, Guo S D.2019.Elementary analysis the Anomalies Characteristics of Aeromagnetic and Geomagnetic[J].World Nonferrous Metals, 03: 186-188.
- Yan D, Fu J F, Jia S S, et al.2024.Combined Magnetic and Transient Electromagnetic Methods to Locate and Predict the Dislocated Concealed Orebody at the Deep Edge of Yanqianshan Iron Deposit in Anshan-Benxi Area[J].GEOSCIENCE, 38(1): 1-11.
- Yu S X, Zhao H Z, Li H M, et al.2014.Geologica-geophysical prospecting model of deep rich iron ore for No.2 mining area of the Gongchangling iron deposit, Liaoning, China[J].Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 29(1): 102-107.
- Yu S X, Yao L D, Li H M, et al.2013.Geologic-geophysical exploration model of Chentaigou iron deposit in Anshan area[J].Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 28(3): 361-365.
- Zhang L C, Zhai M G, Wan Y S, et al. 2012. Research on Precambrian BIF iron ore in North China: Progress and problems[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(11):3431~3445.
- Zhang L C, Dai Y P, Wang C L, et al. 2014.Age, material sources and formation setting of Precambrian BIFs iron deposits in Anshan-Benxi area[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 36(4): 1~15.
- Zhang P, Peng M S, Ou Y Z Z, et al.2012.GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND ORE-SEARCHING GUIDES OF THE IRON DEPOSITS IN ANSHAN-BENXI AREA, LIAONING PROVINCE[J].GEOLOGY AND RESOURCES, 21 (6) : 516-521.

- Zhang Z, Li H M, Li J W, et al. 2021. Geological settings and metallogenesis of high-grade iron deposits in China[J]. Science China Earth Sciences, 51(6):827-852.
- Zhang Y D, Cong H L, Liu J Z, et al. 2014. The ore prospecting effect of aeromagnetic anomalies in the Zhongguang iron deposit, Heilongjiang province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 38(4):629-634.
- Zhang X, Shi F F, Feng C C, et al. 2013. Primary Study on Prospecting Mode of Deep Hidden Sedimentary Metamorphic Iron Deposits—Setting Gouxu Iron Deposit as an Example[J]. Shandong Land and Resources, 29(12): 17-20.
- Zhang C S, Li L, Li H M. 2011. Reviews on status of world's iron ore resource use[J]. RESOURCES & INDUSTRIES, 13(3): 34-43.
- Zheng T K, Yuan F. 2015. Research on 3D prospectivity of Buried Orebodies in Yang Zhuang iron ore deposit based on characteristic analysis method [D]. Master Thesis of Hefei University of Technology.
- Zhou S T. 1994. Geology of Banded Iron Deposits in Anshan-Benxi Area[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Zhu K, Liu Z H, Xu Z Y, et al. 2016. Genesis of altered rocks and high-grade iron ore in Gongchangling iron deposit[J]. Earth Science Frontiers, 23(5):235-251.

附中文参考文献

- 崔培龙, 孙景贵. 2014. 鞍山-本溪地区铁建造型铁矿成矿构造环境与成矿、找矿模式研究[D]. 吉林大学博士学位论文.
- 丁志强, 崔志强, 孟庆敏, 等. 2021. 地面综合物化探方法在航磁异常查证中的应用—以易家湾地区航磁异常为例[J]. 物探化探计算技术, 43(4): 494-500.
- 付海涛, 王恩德, 刘陆山, 等. 2016. 鞍山地区沉积变质型铁矿控矿条件与找矿模型[M]. 沈阳: 辽宁人民出版社.
- 郝兴中, 杨振毅, 陈磊, 等. 2020. 山东省枣庄东崑山隐伏区 BIF 型铁矿成矿预测研究[M]. 资源利用与生态环境——第十六届华东六省一市地学科技论坛论文集: 103-107.
- 何平. 2022. 高精度磁测在山东巨野核桃园铁矿勘查中的应用[J]. 云南地质, 41(1): 118-124.
- 吕水, 李延康, 许曼, 等. 2024. 高精度磁法测量在隐伏磁铁矿勘查中的应用——以冀东迁安曹庄子地区为例[J]. 中国地质调查, 11(4): 26-32.
- 李厚民, 李延河, 李立兴, 等. 2022. 沉积变质型铁矿成矿条件及富铁矿形成机制[J]. 地质学报, 96(9): 3211-3233.
- 李振阳, 李松, 班允峰. 2015. 高精度磁测在辽宁省新宾县榆树铁矿勘查中的应用[J]. 科技与企业, 11(106): 120-121.
- 辽宁有色勘察研究院有限责任公司. 2024. 辽宁省辽阳市弓长岭区高家沟铁矿普查报告 [R].
- 辽宁省冶金地质四〇四队有限责任公司. 2020. 弓长岭露天铁矿何家采区西帮生产勘探地质报告 [R].
- 辽宁省冶金地质四〇四队有限责任公司. 2020. 辽宁省辽阳市弓长岭二矿区铁矿资源储量核实报告 [R].
- 蒙嘉琪, 王志猛, 贾三石, 等. 2024. 基于地球物理技术圈定沉积变质型富铁矿体: 辽宁鞍山齐大山铁矿例析[J]. 现代地质, 38(1): 87-97.
- 任群智. 2011. 鞍山地区铁床地质特征与隐伏矿体找矿研究[D]. 东北大学博士学位论文.
- 沈其韩. 1998. 华北地台早前寒武纪条带状铁英岩地质特征和形成的地质背景[M]//程裕淇. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社: 35-39.
- 沈其韩, 宋会侠. 2015. 华北克拉通条带状铁建造中富铁矿成因类型的研究进展、远景和存在的科学问题[J]. 岩石学报, 31(10): 2795-2815.
- 苏士星, 宋双全, 魏明君. 2022. 综合物探方法在河南济源疙瘩深隐伏铁矿床勘查中的应用[J]. 矿产勘查, 13(08): 143-149.
- 田文法, 郝俊杰, 严加永, 等. 2010. 综合地球物理方法在邯邢式铁矿深部找矿中的应用[J]. 地球物理学进展, 25(4):1442-1452.
- 王海鹏, 陈小宁, 郭守栋. 2019. 航磁异常与地磁异常特征浅析[J]. 世界有色金属, 03: 186-188.
- 闫迪, 付建飞, 贾三石, 等. 2024. 鞍山-本溪地区眼前山铁床深(边)部错断隐伏矿体磁法和瞬变电磁法联合定位及预测[J]. 现代地质, 38(1): 1-11.
- 于仕祥, 赵洪振, 李厚民, 等. 2014. 弓长岭铁矿二矿区深部富铁矿地质-地球物理找矿模型[J]. 地质找矿论丛, 29(1): 102-107.
- 于仕祥, 姚良德, 李厚民, 等. 2013. 鞍山陈台沟铁矿地质-地球物理找矿模型[J]. 地质找矿论丛, 28(3): 361-365.
- 张连昌, 翟明国, 万渝生, 等. 2012. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题[J]. 岩石学报, 28(11): 3431-3445.
- 张连昌, 代堰铭, 王长乐, 等. 2014. 鞍山-本溪地区前寒武纪条带状铁建造铁矿时代、物质来源与形成环境[J]. 地球科学与环境学报, 36(4): 1-15.

-
- 张朋, 彭明生, 欧阳兆灼, 等.2012.辽宁鞍山地区铁矿床地质特征及找矿标志分析[J].地质与资源, 21(6): 516-521.
- 张招崇, 李厚民, 李建威, 等.2021.我国铁矿成矿背景与富铁矿成矿机制[J].中国科学: 地球科学, 51(6): 827-852.
- 张亚东, 龚红蕾, 刘俊长, 等.2014.依据航磁异常寻找中关铁矿的效果[J].物探与化探, 38(4): 629-634.
- 张旭, 石凤凤, 冯超臣, 等.2013.深部隐伏沉积变质型铁矿床找矿模式初探-以苍山县沟西铁矿床为例[J].山东国土资源, 29(12): 17-20.
- 张承帅, 李莉, 李厚民.2011.世界铁矿资源利用现状评述[J].资源与产业, 13(3): 34-43.
- 郑通科, 袁峰.基于特征分析法的杨庄铁矿床隐伏矿体三维成矿预测研究[D].合肥工业大学硕士学位论文, 2015.
- 周世泰.1994.鞍山-本溪地区条带状铁矿地质[M].北京: 地质出版社.
- 朱凯, 刘正宏, 徐仲元, 等.2016.弓长岭铁矿蚀变岩及富矿成因[J].地学前缘, 23(5): 235-251.

